ECMWF模式对昆仑山北坡夏季降水日变化特征的预报性能分析

杨　柳[1]，　杨　霞[2]，　刁　鹏[1]，　胡德喜[1]，　王媛媛[1]

（1. 巴音郭楞蒙古自治州气象局，新疆 库尔勒　841000；2. 新疆维吾尔自治区气象台，新疆 乌鲁木齐　830002）

摘　要：昆仑山北坡地形复杂，降水日变化特征独特导致其降水精细化预报难度大，准确率低。ECMWF模式的整体预报性能世界领先，但其对昆仑山北坡复杂地形下降水日变化特征的预报能力尚不明确。本文利用2020—2023年夏季自动气象站降水观测资料，检验评估了ECMWF模式对昆仑山北坡不同区域夏季降水日变化特征的预报性能。结果表明：（1）模式20:00起报的24 h累计降水预报性能优于08:00，模式对昆仑山北坡海拔大于2000 m区域的降水预报能力优于海拔小于2000 m的区域，模式对西昆仑山北坡降水的捕捉能力优于中昆仑山北坡。（2）模式降水量与观测降水量的日变化特征差异在17:00至次日02:00最大，模式降水频次明显多于观测值，降水强度明显小于观测值，在观测降水较少（多）时段，模式降水易高（低）估；西（中）昆仑山北坡海拔>2000 m（≤2000 m）区域的模式降水量日变化特征与观测降水量的差异较大。（3）模式降水在西昆仑山北坡以对流性降水预报为主，在中昆仑山北坡以大尺度降水预报为主；模式降水与观测降水日变化特征的误差主要来自对流性降水预报。研究成果可为提高昆仑山北坡夏季降水预报准确率和ECMWF模式降水预报产品订正提供参考。

关键词：ECMWF模式；日变化；夏季降水；性能评估；昆仑山北坡

昆仑山北坡属典型的内陆干旱区，拥有高山、戈壁、沙漠、绿洲等复杂地形，具有独特的降水特征，区域降水预报难度较大。近年来全球气候变暖[1-3]，昆仑山北坡降水频次增多且强度增大[4-5]，对当地脆弱的生态环境构成较大威胁[6]。2018年5月21日位于中昆仑山北坡的和田地区皮山县出现短时暴雨，1 h降水量达53.8 mm，与该地年平均降水量（56.4 mm）相当；2019年6月24—28日，中昆仑山北坡出现连续4 d的暴雨过程，在干旱区极为罕见，巴州且末站的日降水量为该地年平均降水量的1.5倍，突破历史极值，因而如何提高该区域降水预报准确率已成为亟待解决的问题。随着数值预报技术的发展和数值模拟方法的不断进步，数值天气预报模式已成为现代气象预报的核心工具。欧洲中期天气预报中心研发的全球天气预报模式（以下简称ECMWF模式）性能处于世界领先地位[7-8]，该模式也是新疆天气预报业务的重要参考依据。然而，数值模式预报受到初始条件不确定性、物理过程参数化方案和数据同化的局限性等约束，无法完全避免预报误差。为了正确认识数值模式预报产品的性能、揭示模式对降水的预报偏差，开展模式降水预报的精细化检验评估必不可少[8-10]。苏翔等[8]、陈晓燕等[9]检验和比较了多种业务常用数值模式在不同区域的降水预报性能，结果均表明ECMWF模式的降水预报性能优于其他全球模式；辛辰等[7]发现ECMWF模式对流性降水的落区预报偏差是我国南方春雨期降水落区预报误差的主要来源。

降水日变化是大气热力过程和动力过程对水循环综合作用的产物，研究降水日变化特征有助于理解降水的形成和发展机制，也是揭示区域天气演变规律的重要途径[11-12]。数值模式对不同区域降水过程的预报能力存在明显差异，针对关注区域开展降水日变化评估是提升模式应用水平的关键[12]。已有不少学者开展了新疆降水日变化特征的相关

收稿日期：2024-08-23；　**修订日期**：2024-10-10
基金项目：新疆"天山英才"培养计划（2023TSYCCX0077）；国家自然科学基金（42065001）；2023年"新疆气象高层次骨干人才"计划
作者简介：杨柳（1982-），女，副高级工程师，主要从事数值预报检验及评估研究. E-mail: evans0831@sina.com
通讯作者：杨霞. E-mail: yangxia921@163.com

研究，发现新疆夏季降水日变化在南、北疆区域呈现显著差异，且有别于我国中东部地区[13]。新疆天山山区夏季总降水量和总降水频次的峰值出现在20:00—22:00，谷值出现在12:00—13:00，夜间降水多于白天，且降水与海拔高度有密切联系[14]。然而，目前针对数值模式日变化预报能力的研究相对较少，特别是针对昆仑山地区降水日变化特征预报性能的评估工作尚不多见，从而无法深入认识数值模式在该区域的预报不确定性，也无法为数值模式的改进和预报产品订正提供明确的切入点[12]。

本文基于ECMWF模式的降水预报产品和自动站降水观测资料，讨论ECMWF模式对昆仑山北坡不同区域夏季降水日变化特征的预报性能及其海拔差异[15]；探讨ECMWF模式降水预报误差的主要来源，上述分析有助于预报业务人员进一步了解ECMWF模式在昆仑山北坡夏季降水预报中的性能，以期为提高昆仑山北坡夏季降水预报准确率和ECMWF模式降水预报产品订正提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料

本文使用的数据资料包括：(1) 2020—2023年夏季(6—8月)ECMWF模式降水预报产品，该产品每日08:00和20:00各起报1次，空间分辨率为0.125°×0.125°，预报时效在0~72 h内，时间分辨率为3 h。ECMWF总降水预报(Total Precipitation，TP)由大尺度降水(Large-Scale Precipitation，LSP)和对流性降水(Convective Precipitation，CP)组成。LSP由云物理方案决定，与稳定层结下的大尺度上升运动有关；CP由积云对流方案决定，主要与局地层结不稳定有关[7]。(2) 与ECMWF模式资料同时段的昆仑山北坡427个(其中，西昆仑山北坡246个，中昆仑山北坡181个)自动气象站(图1)降水观测资料。ECMWF模式降水预报产品可从欧洲中期天气预报中心官方网站(https://www.ecmwf.int/)获取，降水观测资料来自新疆气象信息中心。

昆仑山是中国西部山系的主干，按照地势分为三段(图1)，即西昆仑山、中昆仑山和东昆仑山[16]，参考相关文献[5-6]并结合新疆天气预报业务规范[17]，本文将79°E作为西昆仑山和中昆仑山的分界线，将88°E作为中昆仑山和东昆仑山的分界线。

1.2 研究方法

首先采用最邻近插值法将ECMWF模式降水插值到观测站点，以降水观测值为“真值”，对模式性能进行评估。评估指标包括：相关系数(COR)、相对偏差(RE)、均方根误差(RMSE)、技巧评分(TS)、空报率(FAR)、漏报率(MR)，其计算公式如下：

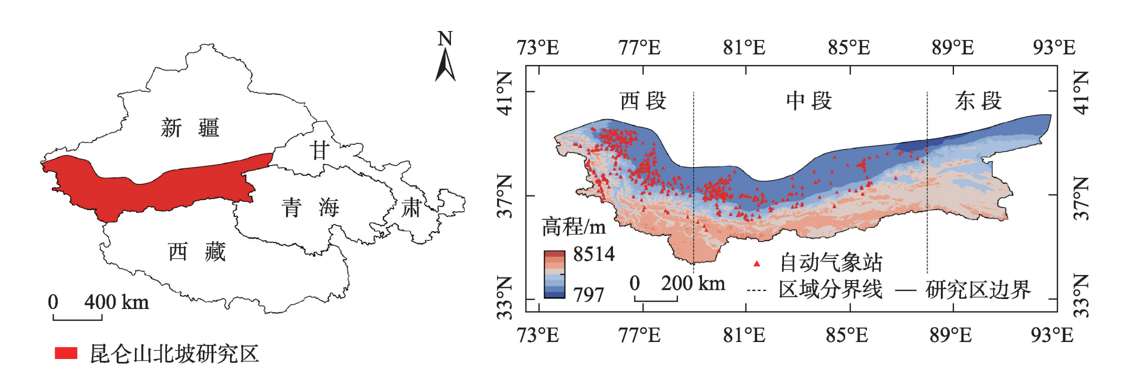
$$\mathrm{COR}=\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(G_i-\bar{G}\right)\left(O_i-\bar{O}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(G_i-\bar{G}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(O_i-\bar{O}\right)^2}} \tag{1}$$

$$\mathrm{RE}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{\left(G_i-O_i\right)}{O_i}\times 100\% \tag{2}$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(G_i-O_i\right)^2} \tag{3}$$

$$\mathrm{TS}=\frac{\sum NA}{\sum NA+\sum NB+\sum NC} \tag{4}$$

$$\mathrm{FAR}=\frac{\sum NB}{\sum NA+\sum NB} \tag{5}$$



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2017)3320，对底图边界无修改。下同。

图1 研究区示意图

Fig. 1 Map of the research area

$$\mathrm{MR}=\frac{\sum NC}{\sum NA+\sum NC} \tag{6}$$

式中: O_i 为站点降水观测数据(mm); G_i 为模式降水插值到站点得到的数值(mm);N为参与检验样本数量;NA表示观测与模式均有降水产生的站点数量;NB表示模式降水发生而观测不发生的站点数量;NC表示模式降水不发生而观测发生的站点数量。COR反映了模式降水量与观测降水量间的线性关系程度,越接近1则二者关系越密切;RE表征了观测降水事件发生时,模式降水量与之相较偏大或偏小的比例;RMSE则表示模式降水量与观测降水量的均方根差异,反映模式降水量的准确度;TS为观测降水与模式降水一致在预报中的比例,数值越大表示预报越准确;FAR为误报降水与所有预报降水事件的比率,反映了预报过度的现象;MR为漏报降水与所有观测降水事件的比率,说明了预报不足的现象。文中降水量是指某时间段内的降水累计量;若某时间段内出现1次降水,则记录1次降水频次;某时间段内降水累计量与该时间段内的降水频次之比为降水强度。

2　结果与分析

2.1　夏季降水总体性能评估

2020—2023年昆仑山北坡夏季年平均降水量的空间分布存在显著的区域差异(图2a),低海拔区域的年平均降水量普遍不足50 mm,降水量大于100 mm的区域主要分布在中高海拔地区[15,18]。从图2a还可以看出,西昆仑山北坡夏季平均降水量随海拔升高呈先增加再减少的特征,即在低海拔的平原区夏季平均降水量最小,在海拔2000 m左右的区域降水量最大(100~200 mm),当海拔超过3000 m后降水量又减小到100 mm以下。与西昆仑山北坡不同,中昆仑山北坡夏季平均降水量整体随海拔的升高而增加。从ECMWF模式08:00和20:00起报的昆仑山北坡2020—2023年夏季平均降水量的空间分布可以看出(图2b,20:00起报图略),两个起报时次的模式降水量在高海拔区域都明显大于观测降水量。此外,两个起报时次的模式降水量均呈现随海拔升高而增加的特征,未能表现出西昆仑山北坡高海拔山区降水量减小的特征。由图2c可以更加直观的看出,模式降水量在西昆仑山北坡整体较观测值偏大,其中高海拔区域的偏大程度更明显,如在塔什库尔干河谷附近,模式降水量较观测值偏大超过200%;在中昆仑山北坡,模式降水量与观测值的偏差较为复杂,偏大和偏小的站点比例接近,与西昆仑山北坡不同,中昆仑山北坡模式降水量较观测值偏大超过200%的站点主要位于低海拔区域。

08:00起报的ECMWF模式24 h累计降水量与观测值的COR在西昆仑山北坡和中昆仑山北坡相当(表1),但西昆仑山北坡模式降水量与观测值的RE远大于中昆仑山北坡,特别是西昆仑山北坡在海拔≥3000 m区域模式降水量与观测值的RE高达

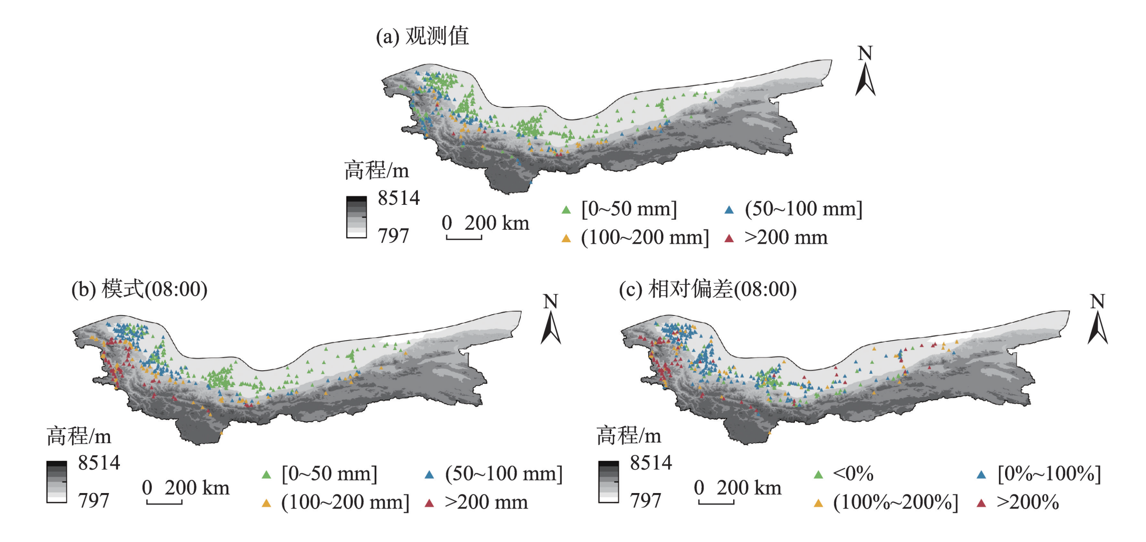


图2　2020—2023年夏季昆仑山北坡降水量年平均及相对偏差的空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of annual average and relative deviation of precipitation on the northern slope of Kunlun Mountains in the summer of 2020-2023

表1 2020—2023年夏季昆仑山北坡ECMWF模式24 h累计降水预报检验结果

Tab. 1 Verification results of 24-hour cumulative precipitation forecast using ECMWF model on the northern slope of Kunlun Mountains in the summer of 2020-2023

起报时间	区域	海拔	COR	RE/%	RMSE/mm	TS	FAR	MR
08:00	西昆仑	整体	0.21	109.90	3.57	0.30	0.68	0.19
		≤1500 m	0.26	36.40	2.69	0.25	0.71	0.35
		1500~2000 m	0.19	40.06	3.45	0.29	0.68	0.22
		2000~3000 m	0.14	131.65	4.87	0.37	0.62	0.08
		≥3000 m	0.23	305.14	4.47	0.31	0.69	0.03
	中昆仑	整体	0.21	10.89	2.78	0.24	0.72	0.32
		≤1500 m	0.11	−1.19	2.24	0.16	0.81	0.49
		1500~2000 m	0.19	4.54	2.77	0.23	0.73	0.36
		2000~3000 m	0.25	16.68	3.75	0.32	0.65	0.20
		≥3000 m	0.22	25.09	4.09	0.36	0.62	0.11
20:00	西昆仑	整体	0.46	90.68	3.03	0.34	0.64	0.12
		≤1500 m	0.52	24.82	2.44	0.33	0.63	0.24
		1500~2000 m	0.49	26.19	2.74	0.36	0.62	0.13
		2000~3000 m	0.41	107.44	3.93	0.39	0.60	0.05
		≥3000 m	0.43	265.09	3.83	0.31	0.69	0.01
	中昆仑	整体	0.60	3.29	2.16	0.33	0.65	0.17
		≤1500 m	0.58	−15.45	1.85	0.25	0.72	0.30
		1500~2000 m	0.62	0.08	2.14	0.34	0.64	0.17
		2000~3000 m	0.66	9.63	2.60	0.39	0.59	0.08
		≥3000 m	0.55	23.86	3.33	0.40	0.60	0.04

305.14%。模式降水预报在西昆仑山北坡的TS整体高于中昆仑山北坡，说明模式对西昆仑山北坡降水的捕捉能力更强。此外，TS在两个区域均表现为海拔2000 m以上的区域优于2000 m以下区域，由于空报率和漏报率对TS影响较大，因此在各海拔区间FAR相差不大的情况下，高海拔区域的MR明显低于低海拔区域是导致模式对高海拔区域降水的捕捉能力更优的主要原因。20:00起报的ECMWF模式降水预报性能明显优于08:00，该起报时次的模式降水量与观测值的COR和TS均较08:00显著增大，而其他检验指标则显著降低。

国内学者研究表明，ECMWF模式在江苏主汛期暴雨预报检验[8]及四川盆地强降水过程的预报性能检验[19]中，08:00起报的降水预报性能优于20:00，这与本文上述结论并不一致，说明ECMWF模式不同起报时次的降水预报在不同区域的预报性能各不相同。

2.2 不同海拔降水日变化特征评估

2.2.1 降水量 由图3a1可知，2020—2023年夏季西昆仑山北坡观测降水量日变化曲线的谷值出现在14:00—17:00，之后逐步上升，02:00达到峰值，傍晚至前半夜（23:00—次日05:00）为观测降水较多时段。ECMWF模式预报降水量在全天各时次均明显高于观测值，其日变化曲线与观测值日变化曲线存在显著差异。两个起报时次的模式降水量日变化曲线的谷值都出现在11:00—14:00，较观测值提前3~6 h。模式自14:00起降水量迅速增长，17:00至次日02:00为降水量大值区，08:00起报的模式降水量在02:00达到峰值，与观测降水量的峰值时间一致，20:00起报的模式降水量在20:00达到峰值，较观测降水量峰值时间提前6 h。分析不同海拔的模式降水量与观测降水量的日变化差异（图3a2~图3a5）发现，观测降水量的峰值时段在不同海拔的出现时段基本一致，但模式降水量峰值的出现时间则表现出随海拔升高而前移的特征。此外，两个起报时次的模式降水量在海拔≤2000 m区域的日变化趋势与观测值基本一致，在海拔>2000 m区域二者的差异较大，模式降水量的峰值时次较观测降水量明显提前。由图3a5可知，午后17:00—20:00观测降水量较小，而模式降水量的日变化曲线中该时段却为高值

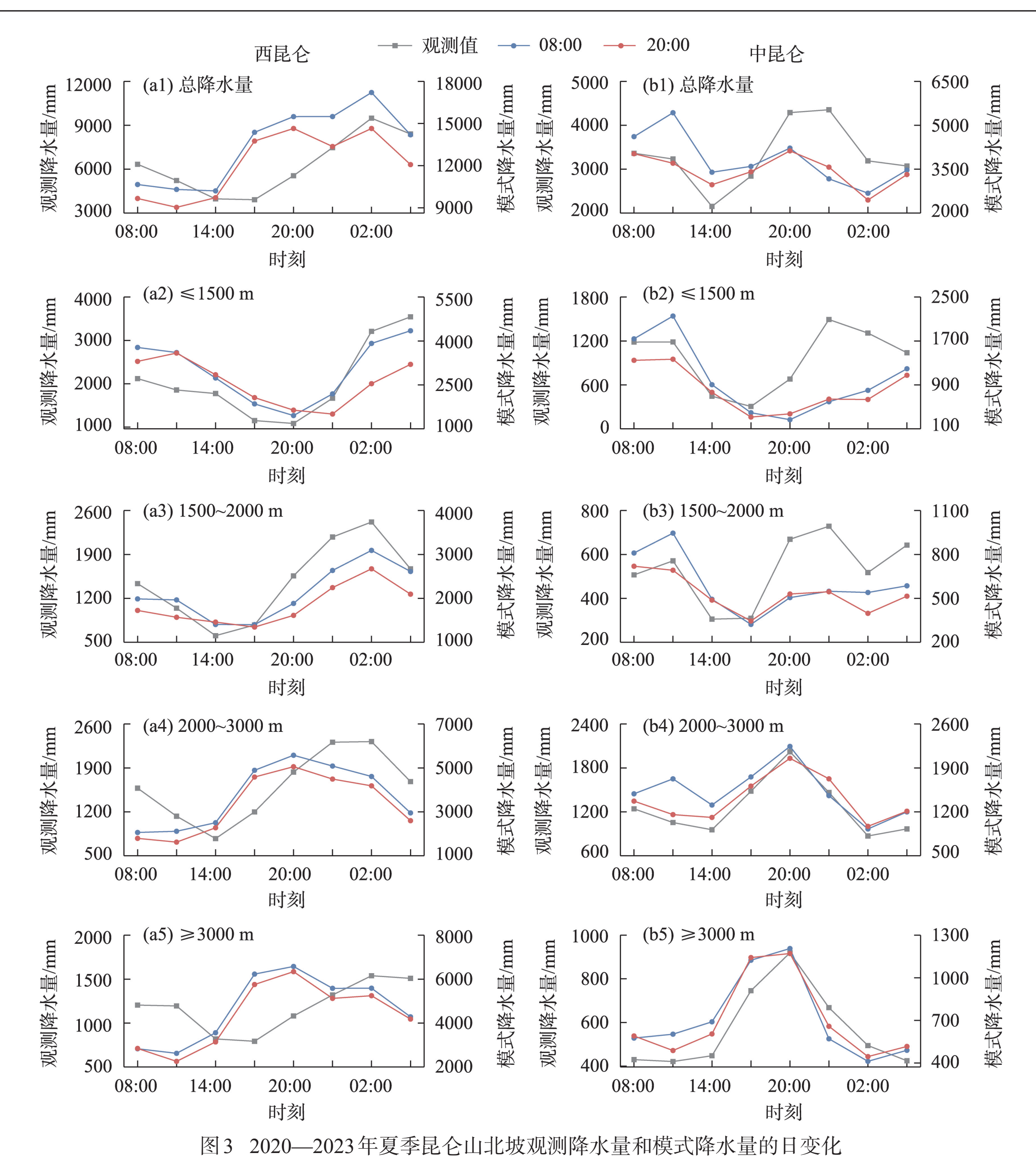


图3　2020—2023年夏季昆仑山北坡观测降水量和模式降水量的日变化

Fig. 3　Daily variations of observed precipitation and model precipitation on the northern slope of Kunlun Mountains during the summer of 2020−2023

区，其中17:00模式降水量较观测值偏大640%。模式降水量与观测降水量在17:00—20:00的差异（图3a1）主要由该时段高海拔区域二者间的显著差异引起。

中昆仑山北坡观测降水量14:00最少，之后迅速增大，20:00—23:00达到峰值（图3b1）。ECMWF模式预报降水量与观测降水量存在阶段性差异，20:00—次日02:00模式降水量较观测值偏小，其他时次则偏大；20:00起报的模式降水量20:00达到峰值，与观测降水量的峰值时间接近，08:00起报的模式降水量11:00达到峰值，较观测降水量峰值时间提前9 h。由图3b2~图3b5可以看出，在海拔≤2000 m的区域，08:00—17:00模式降水量与观测降水量的变化趋势基本一致，17:00之后观测降水量迅速增大并在23:00达到峰值，而模式降水量一直处于低值区，变幅不大；在海拔>2000 m的区域，模式降水量和观测降水量的日变化曲线基本一致。

综上可知，西昆仑山北坡和中昆仑山北坡观测降水量与ECMWF模式预报降水量的日变化特征差异均在17:00至次日02:00最大，但西昆仑山北坡的

显著差异分布在海拔>2000 m区域，而中昆仑山北坡则分布在海拔≤2000 m区域。

2.2.2 降水频次 西昆仑山北坡观测降水频次的日变化趋势（图4a1）与降水量日变化类似，傍晚至次日清晨（23:00—次日08:00）是降水频发时段，其中02:00的降水频次最高，17:00的降水频次最低。ECMWF模式预报降水频次的日变化特征与观测降水存在显著差异，11:00至次日02:00二者变化趋势相反，其中17:00是观测降水频次的谷值时次，却是模式降水的峰值时次。西昆仑山北坡不同海拔的模式降水频次与观测降水频次日变化曲线的差异与降水量日变化的差异类似，即低海拔区域模式降水频次与观测降水频次的日变化曲线较为相似；高海拔区域二者的日变化特征差异显著，呈反向变化的趋势，是产生误差的主要原因。

中昆仑山北坡观测降水频次的日变化曲线（图4b1）呈双峰型，主峰值出现在20:00，次峰值出现在11:00，14:00的降水频次最少。模式降水频次日变化

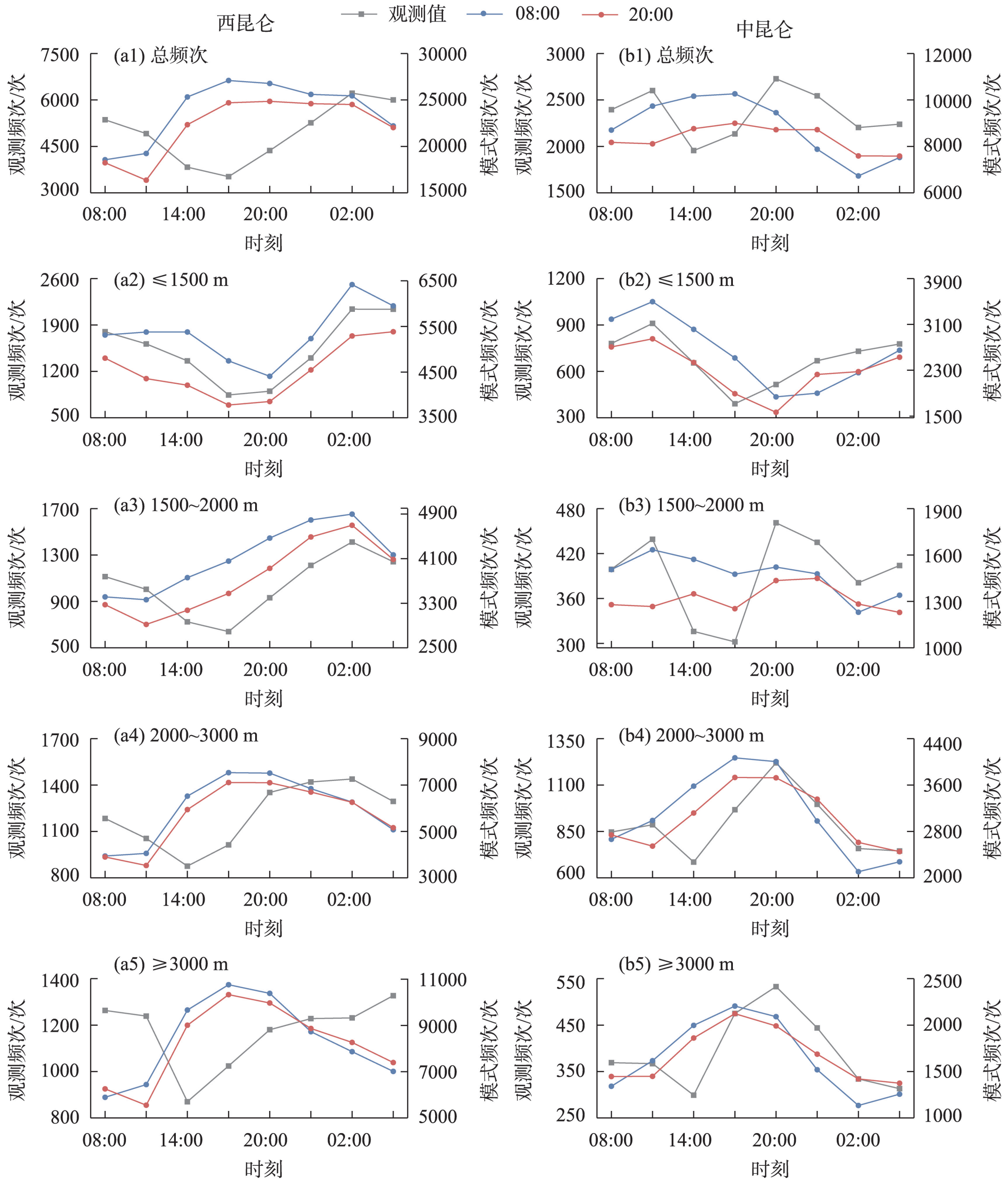


图4 2020—2023年夏季昆仑山北坡观测降水频次和模式降水频次的日变化

Fig. 4 Daily variation of observed precipitation frequency and model precipitation frequency on the northern slope of Kunlun Mountains in the summer of 2020-2023

曲线呈单峰型，08:00—20:00处于高值时段，02:00—05:00为低值时段。在不同海拔区域，1500~2000 m区域的模式降水频次日变化曲线与观测降水频次日变化曲线有明显差异，观测降水频次呈双峰型，14:00—17:00的降水频次最小，模式降水频次各时次呈小幅波动的趋势；其他海拔模式降水频次日变化趋势与观测降水类似，但出现峰值和谷值的时次与观测降水相比相差3 h左右。

综上可知，西昆仑山北坡ECMWF模式降水频次日变化与观测降水日变化的主要差异是由高海拔区域14:00—23:00二者变化趋势相反造成；中昆仑山北坡观测降水频次日变化曲线随海拔升高由双峰型向单峰型转变，但模式降水频次的日变化曲线始终呈单峰型。

2.2.3　降水强度　ECMWF模式预报降水强度在各时次均明显小于观测降水强度(图5)，模式预报降水频次远多于观测降水频次是导致上述结果的原因之一。西昆仑山北坡观测降水总强度的日变化

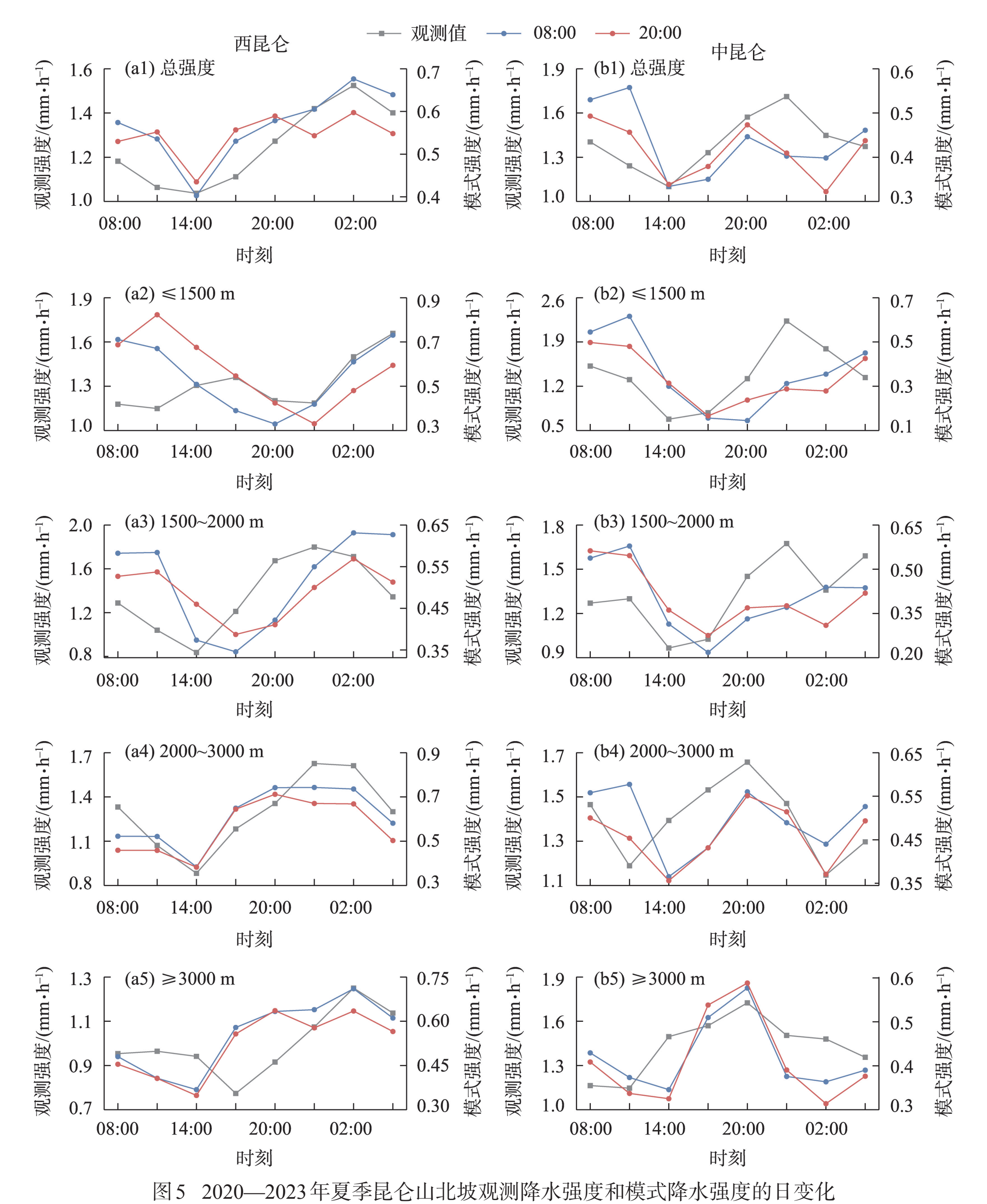


图5　2020—2023年夏季昆仑山北坡观测降水强度和模式降水强度的日变化

Fig. 5　Daily variations of observed precipitation intensity and model precipitation intensity on the northern slope of Kunlun Mountains during the summer of 2020−2023

趋势与降水量日变化趋势基本一致，11:00—17:00为降水强度的谷值时段，傍晚至前半夜（20:00—次日05:00）降水强度较大，02:00达到峰值；模式预报降水强度除14:00出现最小值外，其他时段降水强度在一定范围内小幅波动。从不同海拔观测和模式预报的降水强度日变化曲线可以看出，海拔≤1500 m区域观测降水强度的峰值出现在05:00，11:00降水强度最小，其他海拔区域观测降水强度的日变化曲线峰值出现在23:00—次日02:00，14:00—17:00的降水强度较小。模式预报降水强度与观测降水强度日变化曲线峰值和谷值出现时次相差6 h左右。

从中昆仑山北坡观测降水总强度日变化曲线可以看出，14:00观测降水强度最小，随后迅速上升，傍晚至前半夜降水强度较大，23:00达到峰值，其变化特征与降水量日变化特征基本一致。ECMWF模式预报降水强度日变化曲线与观测降水强度日变化曲线比较，存在明显阶段性差异，08:00—14:00二者变化趋势较为一致，17:00—次日05:00差异明显，模式预报没有刻画出傍晚至前半夜观测降水强度较大的特征。模式预报降水强度在低海拔区域与观测降水的差异特征与总强度一致；而在高海拔区域，模式降水强度与观测降水强度的日变化曲线相对一致，但二者出现峰值和谷值的时次存在差异。

综上，ECMWF模式预报降水强度在西昆仑山北坡和中昆仑山北坡各时次均明显低于观测降水强度。模式预报降水总强度在西昆仑山北坡的日变化趋势与观测降水强度基本一致，但在中昆仑山北坡并没有刻画出傍晚至前半夜（20:00—次日02:00）观测降水强度较大的特征，二者的差异主要源于低海拔区域午后至前半夜模式降水强度与观测降水存在明显差异。陈昊明等[12]研究表明，ECMWF模式对我国大部分区域小时降水特征的预报存在高估降水频次、低估降水强度，与本文结论一致。

2.2.4 检验指标 在西昆仑山北坡，2020—2023年夏季ECMWF模式降水量与观测值的COR和RMSE日变化呈现出明显的阶段性差异（图略），观测降水量较小的时段（08:00—14:00）COR相对较大，RMSE较小，观测降水量较大时段（23:00—次日02:00）COR相对较小，RMSE较大。模式降水在高海拔区域各时次的RE明显高于低海拔区域。模式降水TS日变化曲线的谷值出现在观测降水较少的14:00—17:00，23:00—次日11:00相对较大，高海拔区域的TS小于低海拔区域。西昆仑山北坡不同海拔模式预报FAR均明显大于MR，在观测降水较小时段FAR较大，FAR日变化峰值出现时次与TS的谷值出现时次一致，MR日变化幅度不大。由此可见，模式降水TS的日变化趋势受FAR的影响较大。模式降水在低海拔区域的FAR相对较少，而在高海拔区域的MR相对较少，特别是海拔≥3000 m的区域全天各时次的MR基本均低于0.1。

在中昆仑山北坡，20:00观测降水量较大时，ECMWF模式降水与观测降水的COR较小，且低海拔区域的变幅明显大于高海拔区域。模式降水RE日变化曲线的峰值和谷值分别对应观测值的较小时段和较大时段，说明模式降水在观测降水较少时易高估，而在观测降水较多时易低估。模式预报降水量较观测值的RMSE在高海拔区域明显大于低海拔区域。在观测降水较少时段，TS相对较低，低海拔区域的TS低于高海拔区域，低海拔区域较高的FAR和MR是导致上述结果的原因之一。

3 讨 论

ECMWF模式总降水量预报（TP）由大尺度降水（LSP）预报和对流性降水（CP）预报组成，因此TP的预报误差来自LSP和CP两部分。由图6可以看出，

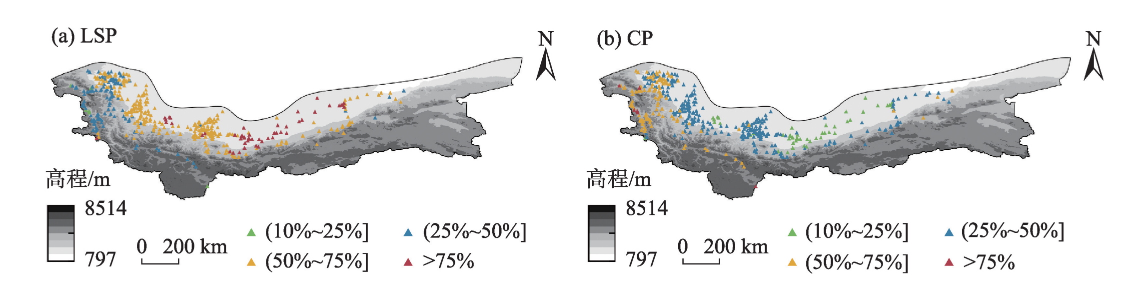


图6 2020—2023年夏季昆仑山北坡模式预报总降水量中LSP、CP占比空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of the proportion of LSP and CP in the total precipitation forecast of the northern slope of Kunlun Mountains in the summer of 2020−2023

20:00起报的模式预报在昆仑山北坡低海拔区域以LSP为主,中昆仑山北坡低海拔区域LSP的占比整体高于西昆仑山北坡。西昆仑山北坡随海拔升高LSP的占比逐渐减小,中昆仑山北坡LSP的占比在不同海拔的差异不大。计算可知,ECMWF模式LSP(CP)降水量与观测降水量的相关系数为0.51(0.24),LSP(CP)降水量与相对偏差的相关系数为0.39(0.49)。从整体来看,ECMWF模式LSP对观测降水的捕捉能力优于CP,模式降水与观测降水的误差更多来自CP。

进一步分析ECMWF模式中LSP和CP占比的日变化特征(图略),在西昆仑山北坡的模式降水量和降水频次中,LSP的占比在05:00—11:00略高或接近于50%,在其他时段LSP的占比均不足50%,降水类型以CP为主,特别是17:00—20:00的CP占比最高,超过65%。在中昆仑山北坡模式降水量和降水频次中,LSP的占比除在14:00—17:00略低于CP外,其他时次均高于CP。中昆仑山北坡模式降水量和降水频次各时次LSP的占比均高于西昆仑山北坡。由此可见,西昆仑山北坡模式降水以CP为主,而中昆仑山则以LSP为主。

由前文分析可知,西昆仑山北坡观测降水量、降水频次与ECMWF模式降水的日变化特征在17:00—次日02:00差异最大,且该差异主要来自海拔>2000 m区域。在上述时段,从图7可以看出,海拔2000 m以上的区域,CP的降水量和降水频次都远大于

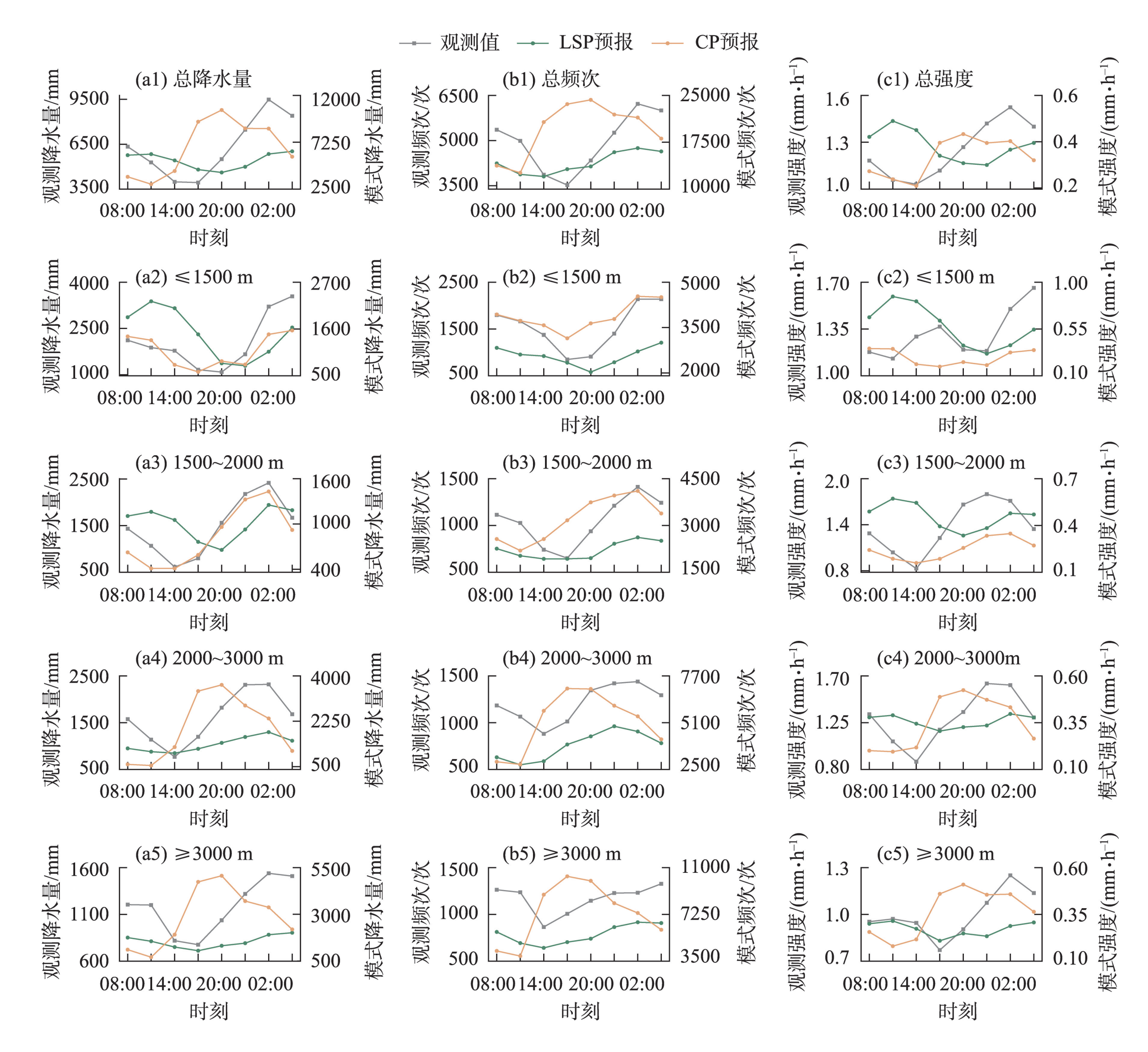


图7　2020—2023年夏季西昆仑山北坡观测和模式预报的降水量、降水频次及降水强度日变化

Fig. 7　Daily variations in precipitation, precipitation frequency, and precipitation intensity observed and predicted by models on the northern slope of the West Kunlun Mountains during the summer of 2020–2023

LSP,其主导了TP的日变化特征。因此,CP是模式降水与观测降水日变化产生差异的主要来源。模式各时次LSP和CP的总降水强度都明显低于观测值,总体来看,LSP总降水强度的日变化趋势基本与观测值呈反位相分布,CP总降水强度的日变化曲线与观测值较为接近,但其峰值出现时次较观测值提前6 h;对比不同海拔区域,相较LSP,CP降水强度的日变化特征与观测值更为相似。

结合前文分析,对比图8可以看出,中昆仑山北坡在海拔低于2000 m的区域,ECMWF模式中LSP降水量远大于CP,因此主导了ECMWF模式TP的日变化特征。LSP降水量的主峰时段在08:00—11:00,次峰时段在20:00—23:00,而观测降水的主峰和次峰值时段却与之相反,从而导致了二者日变化特征的差异。中昆仑山北坡观测降水频次和CP预报降水频次在14:00—20:00呈反位相分布,CP降水频次远大于LSP,因此该时段的模式降水与观测降水的差异主要来源于CP。LSP和CP各时次的降水强度均小于观测值。

数值模式网格分辨率较粗是导致预报误差的原因之一,模式的微物理、边界层和辐射等物理过程的预报方案对其网格分辨率有较大的依赖性[20]。目前ECMWF模式的空间分辨率为0.125°×0.125°,难以捕捉到中小尺度天气系统,对降水系统内部冷却和拖曳作用导致的干冷空气下沉堆积估计不足[20],对小尺度地形对流激发作用难以体现[21],从而导致预报降水偏差。此外,地形本身尺度及其与大气相互作用的复杂性,导致地形影响降水的动

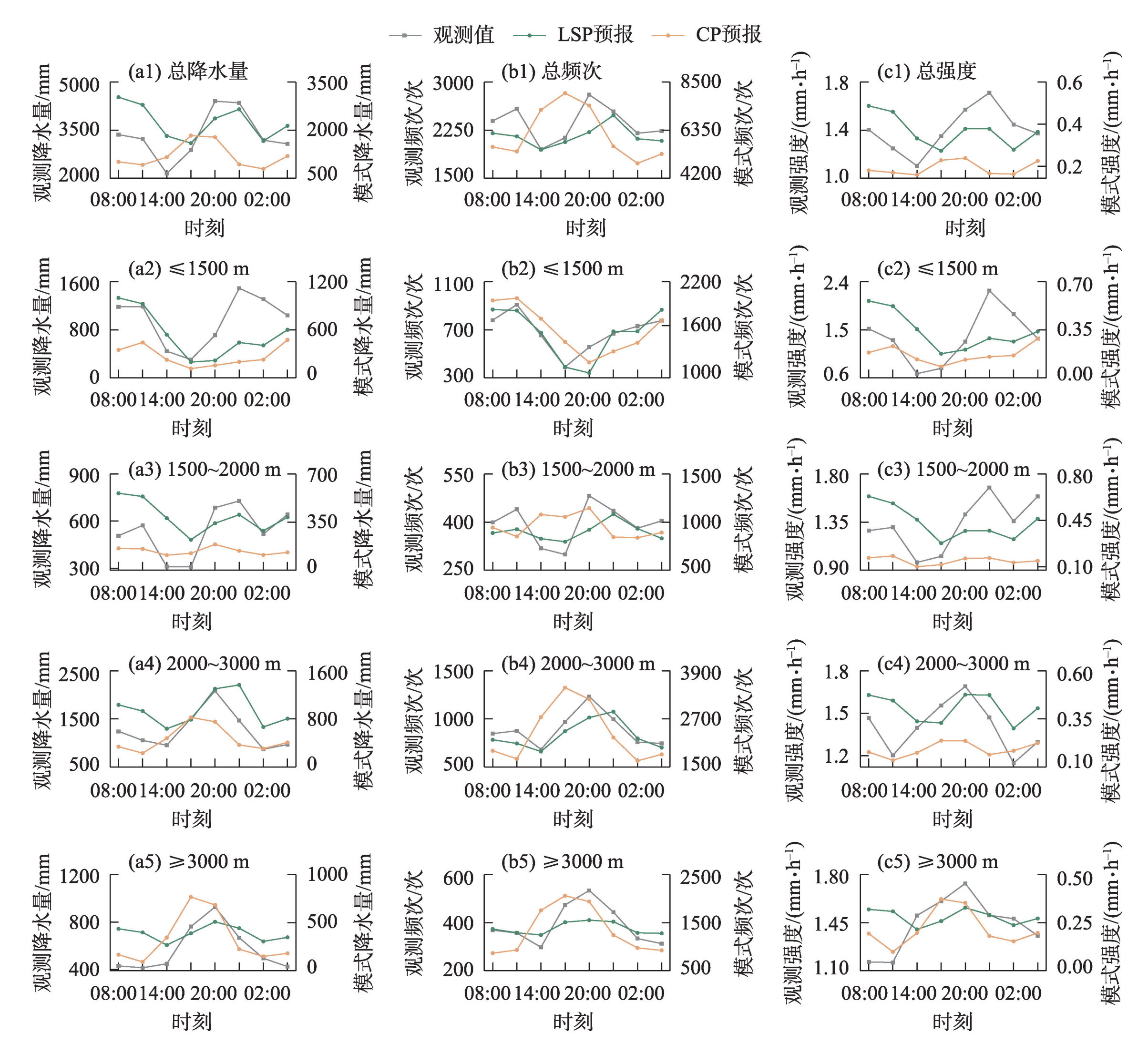


图8 2020—2023年夏季中昆仑山北坡观测和模式预报的降水量、降水频次及降水强度日变化

Fig. 8 Daily variations in precipitation, precipitation frequency, and precipitation intensity observed and predicted by models on the northern slope of the Middle Kunlun Mountains during the summer of 2020−2023

力、热力、微物理效应十分复杂[22-23],而数值模式中物理过程描述能力不足可导致对地形降水的模拟误差,这也可能是ECMWF模式在地形复杂的昆仑山北坡降水预报中产生误差的原因之一。

4 结 论

本文对2020—2023年夏季ECMWF模式预报降水在昆仑山北坡的整体预报性能进行了检验评估,对比分析了ECMWF模式对昆仑山北坡不同区域夏季降水日变化特征的预报性能,并讨论了误差的来源,得出以下结论:

(1) ECMWF模式20:00起报的24 h累计降水预报性能优于08:00;模式对昆仑山北坡海拔大于2000 m区域的降水预报能力优于海拔低于2000 m的区域;模式预报降水量在西昆仑山北坡较观测值整体偏大,在中昆仑山北坡偏大和偏小的站点比例接近;模式预报降水量在西昆仑山北坡和中昆仑山北坡均呈现随海拔升高而增加的特征,无法准确刻画出观测降水在西昆仑山北坡高海拔区域减小的特征。

(2) ECMWF模式预报降水量与观测降水量的日变化特征差异在17:00—次日02:00最大,模式预报各时次降水频次明显多于观测降水,降水强度明显小于观测降水。模式预报在观测降水较少时段对降水量易高估,而在观测降水较多时段易低估。模式降水在14:00—17:00的空报率较高导致其准确率较低,在西昆仑山北坡海拔>2000 m区域和中昆仑山北坡海拔≤2000 m区域,模式降水量日变化特征与观测降水量存在明显差异。

(3) ECMWF模式预报降水在西昆仑山北坡以CP为主,在中昆仑山以LSP为主;两个区域的模式降水与观测降水日变化特征的误差均主要来自CP。

降水预报始终是数值预报面临的最大难题,模式空间分辨率低、动力场预报误差、积云参数化和微物理参数过程造成的误差、地形刻画不足等都会对最终降水预报的准确性产生影响。本文重点分析了ECMWF模式对昆仑山北坡不同区域夏季降水日变化特征的预报性能和误差来源,下一步将基于该区域降水的物理机制,进一步挖掘数值模式的预报误差来源,为该区域的精细化预报提供参考。

参考文献(References):

[1] 杨霞, 周鸿奎, 许婷婷, 等. 南疆夏季不同类型暴雨精细化特征对比分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 747-756. [Yang Xia, Zhou Hongkui, Xu Tingting, et al. Comparative analysis of the fine characteristics of different rainstorms in southern Xinjiang during summer[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 747-756.]

[2] 姚俊强, 李漠岩, 迪丽努尔·托列吾别克, 等. 不同时间尺度下新疆气候"暖湿化"特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 333-346. [Yao Junqiang , Li Moyan, Dilinuer Tuoliewubieke, et al. The assessment on "warming-wetting" trend in Xinjiang at multi-scale during 1961-2019[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 333-346.]

[3] 杨霞, 周鸿奎, 赵克明, 等. 1991—2018年新疆夏季小时极端强降水特征[J]. 高原气象, 2020, 39(4): 762-773. [Yang Xia, Zhou Hongkui, Zhao Keming, et al. Variation features of hourly precipitation in Xinjiang Province during 1991-2018[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(4): 762-773.]

[4] 张俊兰, 杨霞, 肖俊安, 等. 昆仑山北部夏季降水多尺度时空变化特征[J]. 高原山地气象研究, 2023, 43(3): 1-10. [Zhang Junlan, Yang Xia, Xiao Jun'an, et al. Multi-scale temporal and spatial variation characteristics of summer precipitation in northern Kunlun Mountains[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2023, 43(3): 1-10.]

[5] 韩兴胜. 中昆仑山北坡降水量变化特征分析[J]. 人民长江, 2017, 48(增刊): 85-88. [Han Xingsheng. Analysis of precipitation variation characteristics on the northern slope of the Middle Kunlun Mountains[J]. Yangtze River, 2017, 48(Suppl.): 85-88.]

[6] 毛炜峄, 玉素甫·阿布都拉, 程鹏, 等. 1999年夏季中昆仑山北坡诸河冰雪大洪水及其成因分析[J]. 冰川冻土, 2007, 29(4): 553-558. [Mao Weiyi, Yusup Abudula, Cheng Peng, et al. Extreme flood events in 1999 and their formation conditions in northern slopes of the Middle Kunlun Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(4): 553-558.]

[7] 辛辰, 漆梁波. ECMWF模式对南方春雨期降水预报的检验和分析[J]. 暴雨灾害, 2018, 37(4): 383-391. [Xin Chen, Qi Liangbo. Verification and analysis on precipitation forecast of ECMWF Model during spring rain period in South China[J]. Torrential Rain and Disasters, 2018, 37(4): 383-391.]

[8] 苏翔, 刘梅, 康志明, 等. 2020年江苏主汛期短期暴雨预报检验[J]. 气象, 2022, 48(3): 357-371. [Su Xiang, Liu Mei, Kang Zhiming, et al. Verification of short-range torrential rain forecast during the 2020 Jiangsu main flood season[J]. Meteorological Monthly, 2022, 48(3): 357-371.]

[9] 陈晓燕, 孔祥伟, 彭筱, 等. 全球和区域数值模式在甘肃2020年汛期降水预报中的检验评估[J]. 干旱气象, 2022, 40(3): 524-535. [Chen Xiaoyan, Kong Xiangwei, Peng Xiao, et al. Verification and assessment of precipitation forecast based on global and regional numerical models in Gansu in flood season of 2020[J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40(3): 524-535.]

[10] 李智玉, 杜小玲, 朱育雷, 等. 贵州典型地形下强降水特征及其模式预报订正研究[J]. 暴雨灾害, 2024, 43(6): 648-656. [Li Zhiyu, Du Xiaoling, Zhu Yulei, et al. Study on characteristics of heavy precipitation and model prediction correction under typical

topography in Guizhou[J]. Torrential Rain and Disasters, 2024, 43(6): 648–656.]

[11] 宇如聪, 李建, 陈昊明, 等. 中国大陆降水日变化研究进展[J]. 气象学报, 2014, 72(5): 948–968. [Yu Rucong, Li Jian, Chen Haoming, et al. Progress in studies of the precipitation diurnal variation over contiguous China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(5): 948–968.]

[12] 陈昊明, 李普曦, 赵妍. 千米尺度模式降水的检验评估进展及展望[J]. 气象科技进展, 2021, 11(3): 155–164. [Chen Haoming, Li Puxi, Zhao Yan. A review and outlook of verification and evaluation of precipitation forecast at convection-permitting resolution[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2021, 11(3): 155–164.]

[13] 陈春艳, 王建捷, 唐冶, 等. 新疆夏季降水日变化特征[J]. 应用气象学报, 2017, 28(1): 72–85. [Chen Chunyan, Wang Jianjie, Tang Ye, et al. Diurnal variations of summer precipitation in Xinjiang[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2017, 28(1): 72–85.]

[14] 郭玉琳, 赵勇, 周雅蔓, 等. 新疆天山山区夏季降水日变化特征及其与海拔高度关系[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 57–65. [Guo Yulin, Zhao Yong, Zhou Yaman, et al. Diurnal variation of summer precipitation and its relationship with altitude in Tianshan Mountains of Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 57–65.]

[15] 智协飞, 霍自强. 中国东南地区复杂地形下降水概率预报的订正研究[J]. 大气科学学报, 2023, 46(2): 230–241. [Zhi Xiefei, Huo Ziqiang. Calibration of the probabilistic forecast of precipitation over complex terrain in Southeast China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2023, 46(2): 230–241.]

[16] 吕拉昌. 中国地理[M]. 北京: 科学出版社, 2016. [Lyu Lachang. Geography of China[M]. Beijing: Science Press, 2016.]

[17] 张家宝, 苏起元, 孙沈清, 等. 新疆短期天气预报指导手册[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1986. [Zhang Jiabao, Su Qiyuan, Sun Shenqing, et al. Guidelines for Short-term Weather Forecast in Xinjiang[M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 1986.]

[18] 徐月月, 何清, 毛东雷, 等. 2022–2023年中昆仑山北坡不同海拔气象要素梯度对比分析[J]. 高原气象, 2025, 44(1): 224–239. [Xu Yueyue, He Qing, Mao Donglei, et al. Comparative analysis of the gradient of meteorological elements at different elevations of the north slope of the Middle Kunlun Mountains from 2022 to 2023[J]. Plateau Meteorology, 2025, 44(1): 224–239.]

[19] 龙柯吉, 杨康权, 康岚. 多模式对四川盆地强降水过程的预报性能检验[J]. 干旱气象, 2024, 42(3): 473–483. [Long Keji, Yang Kangquan, Kang Lan. Performance verification multi-model heavy rainfall processes prediction in the Sichuan Basin[J]. Journal Arid Meteorology, 2024, 42(3): 473–483.]

[20] 宫宇, 代刊, 徐珺, 等. GRAPES-GFS模式暴雨预报天气学检验特征[J]. 气象, 2018, 44(9): 1148–1159. [Gong Yu, Dai Kan, Xu Jun, et al. Synoptic verification characteristics of operational GRAPES GFS Model heavy rain event forecast[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(9): 1148–1159.]

[21] Luo Yali, Gong Yu, Zhang Dalin. Initiation and organizational modes of an extreme-rain-producing meso-scale convective system along a Mei-Yu front in East China[J]. Monthly Weather Review, 2014, 142(1): 203–221.

[22] 廖菲, 洪延超, 郑国光. 地形对降水的影响研究概述[J]. 气象科技, 2007, 35(3): 309–316. [Liao Fei, Hong Yanchao, Zheng Guoguang. Review of orographic influences on surface precipitation[J]. Meteorological Science and Technology, 2007, 35(3): 309–316.]

[23] 钟水新. 地形对降水的影响机理及预报方法研究进展[J]. 高原气象, 2020, 39(5): 1122–1132. [Zhong Shuixin. Advances in the study of the influencing mechanism and forecast methods for orographic precipitation[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(5): 1122–1132.]

Analysis of the forecast performance of the ECMWF Model for the diurnal variation characteristics of summer precipitation on the northern slope of the Kunlun Mountains

YANG Liu[1], YANG Xia[2], DIAO Peng[1], HU Dexi[1], WANG Yuanyuan[1]

(1. Bayingol Mongolian Autonomous Prefecture Meteorological Bureau, Korla 841000, Xinjiang, China;
2. Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: The northern slope of the Kunlun Mountains has a complex terrain and unique diurnal variation of precipitation, which lead to low accuracy in refined precipitation forecasting. The ECMWF model has world-leading forecast performance, but its ability to predict the diurnal variation in precipitation in complex terrain is still unclear. This study used precipitation data from automatic meteorological stations during the summer of the 2020–2023 season to verify and evaluate the ECMWF model's forecast performance for the diurnal variation of summer precipitation at various regions on the northern slope of the Kunlun Mountains. The results show the following. (1) The 24 h cumulative precipitation forecast performance of the ECMWF model initialized at 20:00 was better than that which initialized at 08:00; the model's precipitation forecast capability for areas above 2000 m in altitude on the northern slope of the Kunlun Mountains was better than that for areas below 2000 m in altitude; the ECMWF model's ability to capture precipitation in the Western Kunlun Mountains was superior to that in the Central Kunlun Mountains. (2) The ECMWF model's forecasts of daily precipitation variations exhibited the greatest discrepancies from observed precipitation between 17:00 and 02:00 the following day. The model's predicted frequency of precipitation events was much higher than the observed frequencies, but the predicted intensity of precipitation was markedly lower the observed. During periods of low observed precipitation, the model was prone to overestimating precipitation. In regions of the western (central) Kunlun Mountains, on the north-facing slopes with elevations above 2000 m (and up to 2000 m), the model's daily variation in precipitation significantly diverged from that of the observed precipitation. (3) The ECMWF model's precipitation forecasts were dominated by convective precipitation (CP) in the Western Kunlun Mountains and by large-scale precipitation (LSP) in the Central Kunlun Mountains. Within the ECMWF model, LSP had a better capturing ability for observed precipitation than CP, and the discrepancies between model precipitation forecasts and observed precipitation were more likely to come from CP. These findings provide a reference for improving the accuracy of summer precipitation forecasts on the northern slope of the Kunlun Mountains and for the correction of the ECMWF model's precipitation forecasts.

Keywords: ECMWF model; diurnal variation; summer precipitation; performance assessment; northern slope of the Kunlun Mountains